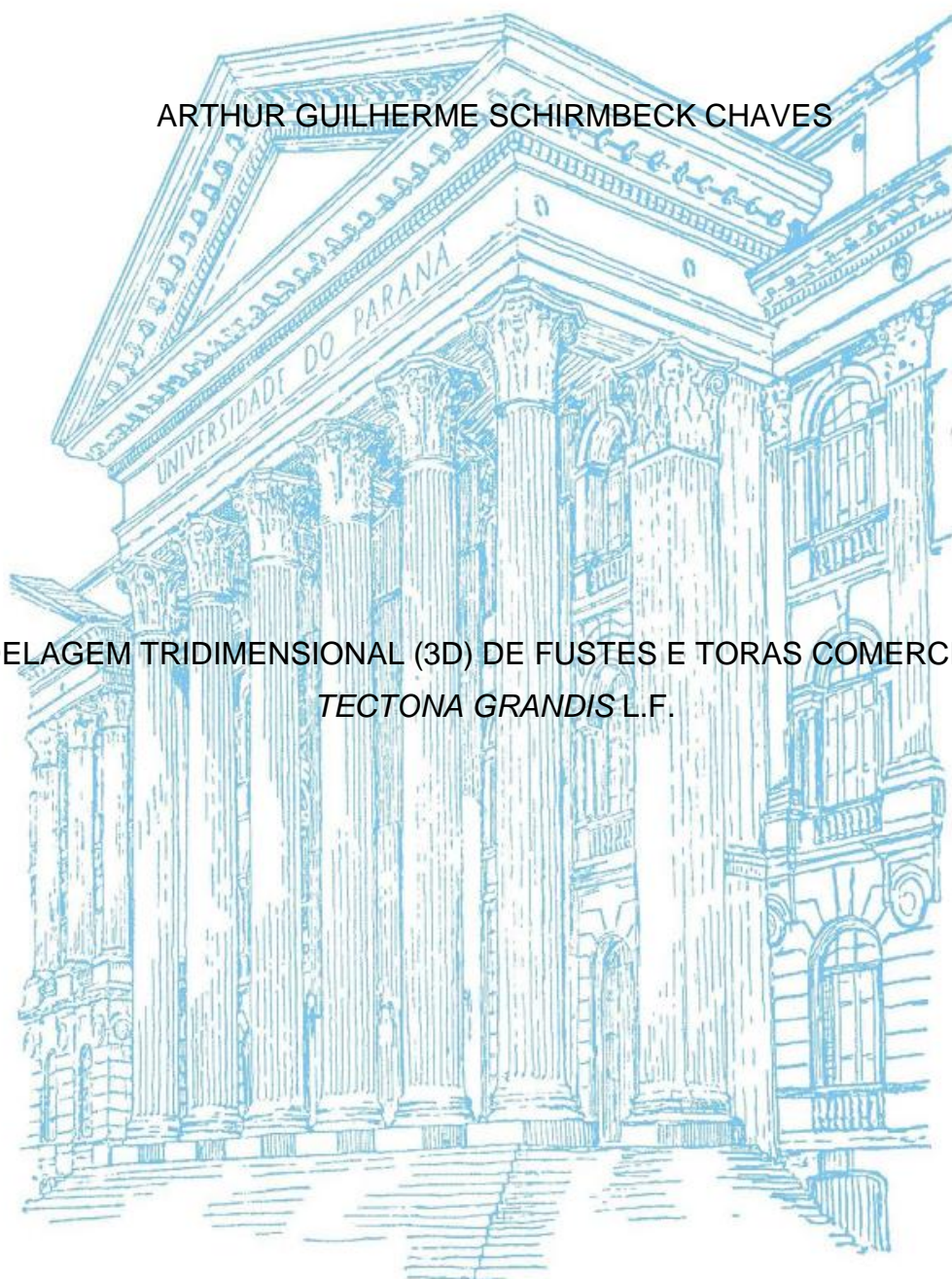


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ARTHUR GUILHERME SCHIRMBECK CHAVES

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) DE FUSTES E TORAS COMERCIAIS DE
TECTONA GRANDIS L.F.



CURITIBA

2016

ARTHUR GUILHERME SCHIRMBECK CHAVES

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) DE FUSTES E TORAS COMERCIAIS DE
TECTONA GRANDIS L.F.

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de especialização
em Manejo Florestal de Precisão, do
Programa de Educação Continuada em
Ciências Agrárias, da Universidade
Federal do Paraná, como pré-requisito
para obtenção do título de especialista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto
Sanquetta

CURITIBA

2016

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) DE FUSTES COMERCIAIS E DE PRODUTOS DO DESDOBRO PARA *TECTONA GRANDIS* L.F.

Arthur Guilherme Schirmbeck Chaves¹,

¹ Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Florestais e Ambientais, Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico. IFMT - Instituto Federal de Mato Grosso. Campus Cáceres. Av. dos Ramires, s/n - 78200000 Cáceres, MT, Brasil. E-mail: arthur.chaves@cas.ifmt.edu.br.

RESUMO

O desenvolvimento e a aplicação de inovações tecnológicas vem sendo um dos principais focos dos setores produtivos. Uma inovação tecnológica que vem ganhando destaque é a modelagem tridimensional (3D) das florestas em atividades de inventário e planejamento florestal. Empregando sensores ativos (LIDAR) e sensores passivos (Fotogrametria), sob plataformas aéreas ou terrestres, foi possível transformar uma floresta real numa nuvem de pontos (Point Cloud Data) tridimensionais ou em objetos 3D. Neste trabalho pode-se avaliar a acurácia do escaneamento tridimensional de fustes para *Tectona grandis* L.f. por meio da fotogrametria digital empregando fotos retiradas com um smartphone no campo. Com a metodologia empregada neste trabalho foi possível modelar as toras inferiores (0,10 m a 2,45 m) com maior acurácia do que com o método tradicional de Smalian com secções de um metro.

Palavras-Chave: Cubagem, Teca, Xilômetro, Escaneamento, Fotogrametria de proximidade.

ABSTRACT

The development and application of technological innovations have been one of the main focuses of the productive sectors. One technological innovation that has been gaining prominence is the three-dimensional (3D) modeling of forests in inventory and forestry planning activities. Using active sensors (LIDAR) and passive sensors

(Photogrammetry), under aerial or terrestrial platforms, it has been possible to transform a real forest into a three-dimensional Point Cloud Data or in 3D objects. In this work was evaluated the accuracy of the three-dimensional scanning of stems for *Tectona grandis* L.f. through digital photogrammetry employing photos taken with a smartphone in the field. With the methodology employed in this work it was possible to model the lower logs (0.10 m to 2.45 m) more accurately than with the traditional Smalian method with one meter sections.

Keywords: Volume Measurement, Teak, Xylometer, Scanning, Close to range.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Fundamentação teórica	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Geral	4
1.3.2 Específicos.....	4
1.4 Justificativa	4
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
2.1 Local de Estudo	5
2.2 Metodologia	6
2.2.1 Inventário Florestal.....	6
2.2.2 Seleção das árvores para cubagem e modelagem	6
2.2.3 Escaneamento tridimensional para cubagem 3D.....	6
2.2.4 Cubagem rigorosa pelo método de Smalian	7
2.2.5 Cubagem real pelo método do Xilômetro	7
2.2.6 Construção dos modelos tridimensionais.....	8
2.2.7 Cálculos volumétricos	9
2.2.8 Gráficos e Testes estatísticos	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
3.1 Inventário Florestal	11
3.2 Descrição das Árvores Amostradas.....	12
3.3 Escaneamento e modelagem tridimensional para cubagem 3D.....	13
3.4 Cubagem real pelo método do Xilômetro.....	15
3.5 Cubagem rigorosa pelo método de Smalian.....	15
3.6 Construção e medição dos sólidos tridimensionais	16

3.7 Desempenho dos métodos de cubagem	17
4. CONCLUSÕES	22
5. AGRADECIMENTOS	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa da distribuição dos talhões de Teca na Fazenda Mineira.	5
Figura 2: Xilômetro usado para medição volumétrica.	8
Figura 3: Imagens do procedimento de aferição dos volumes das toras com o auxílio do xilômetro.	8
Figura 4: Histograma da distribuição diamétrica dos povoamentos clonais.	11
Figura 5: Distribuição diamétrica exigida pelo inventário e das árvores amostradas.	12
Figura 6: Vista frontal e superior das fotos retiradas para modelagem tridimensional dos fustes de <i>Tectona grandis</i> L.f.	13
Figura 7: Classes de altura máxima passíveis de modelagem.	13
Figura 8: A presença de luminosidade irregular e de galhos nas fotografias atrapalha a modelagem dos fustes.	14
Figura 9: Frequência do número de toras passíveis de serem modeladas por árvore com a técnica de fotogrametria digital.	15
Figura 10: Modelo tridimensional de um fuste na escala real.	16
Figura 11: Procedimento de corte e secionamento do sólido tridimensional em seções de 2,35 metros de comprimento.	17
Figura 12: Histograma dos erros de cubagem para os dois métodos de cubagem.	18
Figura 13: Distribuição gráfica dos resíduos para as estimativas volumétricas das toras comerciais de <i>Tectona grandis</i> L.f.	18
Figura 14: Desempenho dos métodos de cubagem para cada classe de tora.	20
Figura 15: Exemplo da metodologia conhecida como Close to Range.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatística descritiva das alturas mensuradas nas parcelas amostradas.	11
Tabela 2: Análise descritiva das árvores amostradas.	12
Tabela 3: Estatística descritiva dos volumes das árvores e das toras aferidas....	15
Tabela 4: Estatística descritiva dos volumes de todas as árvores e toras por classe de altura.	16
Tabela 5: Estatística descritiva dos volumes das toras cubadas pelo sólido tridimensional.	17
Tabela 6: Acurácia dos métodos de cubagem para cada classe de tora.	20

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A humanidade tem experimentado evoluções tecnológicas sucessivas que vêm transformando a indústria e o estilo de vida das pessoas. As evoluções nas áreas de eletrônica, informática, robótica, telecomunicações e indústria aeroespacial, ampliaram as diversas capacidades humanas. E toda esta tecnologia deixou de ser uma exclusividade da indústria para ser uma realidade no cotidiano das pessoas.

Acompanhar, desenvolver e aplicar as inovações tecnológicas tem sido um dos principais focos dos setores produtivos. A “inovação” e a “criatividade” tornaram-se palavras de ordem para os principais empreendedores. Para o setor florestal não tem sido diferente: essas tecnologias permitem a “Jornada rumo ao Manejo Florestal de Precisão”; termo usado por Brown (2014) para definir a busca contínua por tecnologias de precisão na gestão de florestas.

Dentre as inovações tecnológicas mais importantes para o setor florestal tem se destacado o uso das Geotecnologias, que são um conjunto de técnicas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação com referência geográfica ou espacial. Dentre essas tecnologias vem se destacando o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) para serviços de levantamentos topográficos e mapeamento de atributos silviculturais das florestas plantadas e nativas. A tecnologia vem se tornando mais barata e acessível, e os profissionais têm buscado cada vez mais a capacitação para emprego destas tecnologias.

Outra tecnologia que vem ganhando destaque é a modelagem tridimensional (3D) das florestas em atividades de inventário e planejamento florestal. Estas tecnologias empregam sensores ativos (Light Detection And Ranging - LIDAR) e passivos (Fotogrametria), sob plataformas aéreas ou terrestres, para registrar, construir e transformar uma nuvem de pontos (Point Cloud Data) em modelos tridimensionais da floresta real.

Segundo Gatziolisa et al. (2010), as representações detalhadas dos fustes de árvores oferecidas a partir de modernas tecnologias como o LiDAR terrestre

(TLS) podem ser uma fonte alternativa, econômica e não destrutiva de informação de dimensionalidade do fuste capaz de suportar o desenvolvimento de equações de volume de árvores.

1.2 Fundamentação teórica

A nuvem de pontos de dados (Point Cloud Data), ou mais comumente “nuvem de pontos 3D”, é um conjunto de pontos de dados distribuídos no sistema tridimensional de coordenadas, geralmente definidas por três eixos: X, Y e Z.

Destacam-se dois principais “métodos de não contato”, que usam ondas de luz, para extração de nuvens de pontos 3D: o escaneamento a laser e a fotogrametria.

Existem muitas possibilidades e tecnologias de escaneamento a laser no mercado hoje: desde aplicativos gratuitos ligados a sensores de movimentos Kinect da Microsoft (usado em jogos do videogame Xbox) até aparelhos modernos de escaneamento 3D como os oferecidos por empresas como a *Trimble*.

A Fotogrametria é a prática de extrair dimensões espaciais em 3D de duas ou mais fotografias 2D tiradas em posições diferentes. O sistema de coordenadas por pixel servem para arquivar os dados das imagens através de posições em linha ou colunas (2D). Através de princípios de estereoscopia e algoritmos que determinam, por exemplo, a paralaxe (distância horizontal entre as imagens) é possível calcular a terceira dimensão ou a dimensão de profundidade a partir de dois planos de coordenadas planas.

Existem diversos softwares que utilizam técnicas de fotogrametria para medir um grande número de pontos refletidos das superfícies de objetos. O produto desta análise é o conjunto de dados 3D ou nuvem de pontos de dados (Point Cloud Data).

Segundo James et al. (2015), a extração de nuvem de pontos a partir da fotogrametria segue geralmente os seguintes passos:

- I. Reconhecimento de características padrões - cada fotografia é analisada e são verificadas quais características chave são invariantes à escala e à rotação para que estas possam ser potencialmente usadas para alinhar as fotos.

- II. Cruzamento de características – as características têm que ser cruzadas entre as fotos. Há uma grande variedade de algoritmos disponíveis para efetuar este cálculo.
- III. O alinhamento das câmaras - as coordenadas das câmaras em relação umas as outras e as características reconhecidas são calculadas através da minimização do erro das distâncias nas imagens com as distâncias esperadas para todas as câmaras. A Minimização geralmente é realizada usando o algoritmo de Levenberg-Marquardt que é amplamente conhecido como ajuste de pacote.
- IV. Construção da nuvem de pontos densa - uma vez que as câmeras estão alinhadas e as distâncias entre as principais características são conhecidas, a construção da nuvem de pontos densa pode começar. Este passo é o mais computacionalmente intensivo.

Ainda acrescento um último passo empregado atualmente pelos softwares:

- V. Texturização - nesta fase, o software parametriza as superfícies, possivelmente cortando-a em pedaços menores, e então mistura as fotos de origem para formar um atlas de textura.

Estão disponíveis uma grande variedade de softwares, pagos ou livres, para extração da nuvem de pontos e modelagem 3D. As principais diferenças entre os softwares são quanto a plataforma de processamento, quanto ao potencial de modelagem automática, quanto a qualidade da modelagem e quanto ao tipo de aquisição fotográfica passível de processamento: curta distância (Close Range), Aérea por Satélites, Aérea embarcadas (Aviões) e Aéreas por VANT's (UAS). Cada software emprega seus próprios algoritmos e a maioria destes não está disponível ao usuário

Após a construção da nuvem de pontos densa, esta é então tratada e transformada em uma superfície poligonal através de técnicas de triangulação. Cada software pode empregar uma técnica e algoritmos próprios para geração de superfícies através da interpolação (por Splines, B-Splines e NURBS) e integração dos pontos para a obtenção de modelos sólidos tridimensionais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Checar a acurácia volumétrica de modelos tridimensionais de fustes e toras comerciais de Teca construídos a partir da fotogrametria digital.

1.3.2 Específicos

- I. Mensurar e modelar tridimensionalmente os fustes de Teca até a altura comercial para obtenção da volumetria digital;
- II. Cubicar o volume dos fustes pelo método tradicional de Smalian com intervalo entre seções de 1 metro;
- III. Cubicar o volume das toras pelo método do xilômetro;
- IV. Avaliar a exatidão do volume calculado das toras pelo método de Smalian e pelo modelo 3D.

1.4 Justificativa

A cubagem de fustes ou toras geralmente emprega o abate destrutivo de árvores amostra; e ao proceder a cubagem considera uma média de dois diâmetros obtidos com auxílio de uma suta em cada uma das alturas mensuradas. Esse engenheiro desconsidera a irregularidade (forma complexa diferente de um círculo ou uma elipse) destas seções; este engenheiro florestal também não leva em consideração tortuosidades existentes ao longo do fuste. O processo de cubagem por abate destrutivo das árvores é oneroso e nem sempre traz resultados satisfatórios.

Atualmente as técnicas de modelagem de fustes comerciais não consideram a forma irregular das seções transversais e nem a tortuosidade existente ao longo do fuste de árvores de *Tectona grandis* L.f.

Este trabalho tem por objetivo propor o uso da “Fotogrametria de Proximidade” (Close Range) para a cubagem e volumetria tridimensional (3D) de fustes comerciais de Teca.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de Estudo

O município de Cáceres-MT está localizado na região do Pantanal Mato-grossense. A temperatura média anual é de 22,6°C e o clima é caracterizado, segundo Köppen, como Tropical subúmido (Aw). A altitude média é de 176 m. A precipitação média anual é de 1350 mm, com um período chuvoso geralmente compreendido entre outubro a março. O relevo predominante é plano e/ou levemente ondulado (INMET, 2016; IBGE, 2016).

A propriedade selecionada para o estudo foi a fazenda “Mineira”, localizada as margens da BR-070, a quinze quilômetros da cidade de Cáceres na saída para a cidade de Cuiabá. A sua sede está circunscrita às coordenadas geográficas 16° 12' 03" Sul e 57°36'33" Oeste. Atualmente a propriedade possui atividades de bovinocultura, piscicultura e silvicultura, onde a área total de plantios de Teca é aproximadamente de 54,54 hectares (Figura 1).

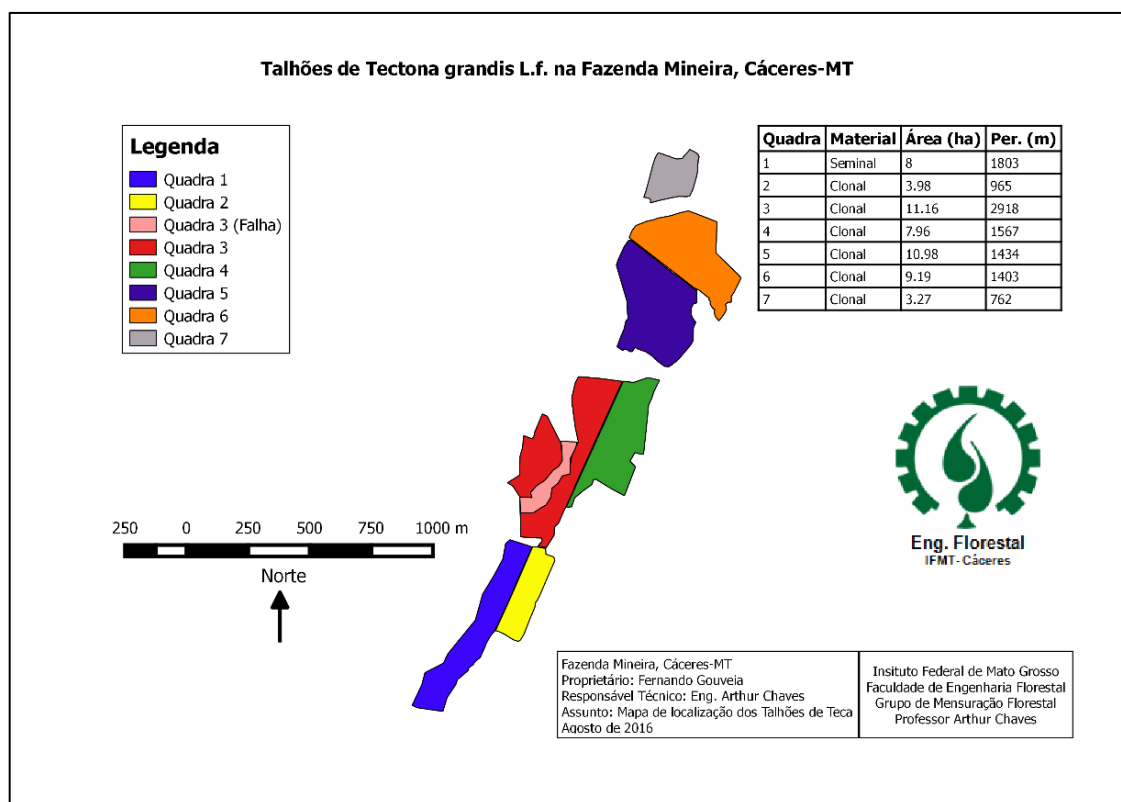


Figura 1: Mapa da distribuição dos talhões de Teca na Fazenda Mineira.

Os povoamentos de teca foram implantados nos anos de 2009 e 2010 e dividem-se em um Talhão com material genético seminal (Quadra 1); e seis Talhões (Quadras 2 a 7) com material genético multiclonal proveniente da empresa *Bioteca* (Variedades não confirmadas).

2.2 Metodologia

2.2.1 Inventário Florestal

Foi realizado o inventário florestal nos talhões florestais com material genético multiclonal (46,54 ha). O processo de amostragem foi sistemática por parcelas com intensidade amostral de uma parcela para cada 2,6 hectares, totalizando dezoito (18) parcelas de 720 m² (24 m x 30 m).

Em cada parcela foram mensuradas as seguintes informações: circunferência à altura do peito (CAP) de 100% dos indivíduos, altura comercial (hc) e altura total (ht) de seis indivíduos por parcela (10%) respeitando a distribuição diamétrica.

2.2.2 Seleção das árvores para cubagem e modelagem

A partir dos dados de inventário, foram construídos histogramas de frequência dos diâmetros em classes com intervalos de 1,5 centímetros. E conforme esta proporção foram selecionados 30 indivíduos arbóreos com distribuição diamétrica próxima a levantada no inventário florestal.

2.2.3 Escaneamento tridimensional para cubagem 3D

Através de um caminhar aleatório e da distribuição diamétrica de cada talhão trinta árvores foram selecionadas. Em cada um dos talhões foram medidas por volta de cinco árvores.

O procedimento para o escaneamento 3D seguiu os seguintes passos:

- a) Confirmação da classe de CAP desejado com fita métrica;
- b) Limpeza das folhas depositadas no chão que impediam a

- visualização da base do fuste;
- c) Demarcação do número da árvore com tinta spray na face Sul com auxílio de bússola.
 - d) Demarcação das circunferências a 0,10 m e 1,30 metros de altura do fuste com fita adesiva vermelha;
 - e) Giro fotográfico de 360° ao redor do fuste enquadrando sua base até a altura comercial do fuste (30 – 50 fotos). As fotos foram tiradas com auxílio de um Smartphone Samsung Galaxy J5 a uma distância regular de enquadramento da base ao fuste, e na altura do observador (fotógrafo).

2.2.4 Cubagem rigorosa pelo método de Smalian

Após o escaneamento fotográfico a árvore foi abatida com motosserra numa altura de corte próximo a 10 centímetros.

O procedimento de cubagem seguiu os seguintes passos:

- a) Medição da altura do toco;
- b) Medição da altura total e altura comercial com trena métrica;
- c) Medição de dois diâmetros transversais com suta nas alturas 0,10, 0,70, 1,30, 2,30 e a cada um metro até a altura comercial.

2.2.5 Cubagem real pelo método do Xilômetro

Depois de realizada a cubagem absoluta por Smalian, a trena foi “zerada” no início do fuste para demarcar a cada 2,35 metros os pontos de traçamento das toras.

As toras foram classificadas em ordem ascendente de tora A (0,10 m a 2,45 m), tora B (2,45 m a 3,80 m), tora C (3,80 m a 7,15 m) e assim sucessivamente até a altura comercial. E em cada tora foi assinalada com tinta spray seu número e sua classe.

Foi construído um xilômetro com dimensões de 0,80 metros de diâmetro e 3,00 metros de altura para imersão e medição do volume das toras. Foi instalado um nível externo com mangueira transparente para verificar a variação da altura da

lâmina d'água dentro do xilômetro. A variação de um metro linear da lâmina d'água equivale a meio metro cúbico no volumétrico (Figura 2).



Figura 2: Xilômetro usado para medição volumétrica.

Todas as toras foram submergidas no xilômetro para aferição de seu volume real com auxílio de uma roldana para as toras leves ou de uma catraca para as toras mais pesadas (Figura 3).



Figura 3: Imagens do procedimento de aferição dos volumes das toras com o auxílio do xilômetro.

2.2.6 Construção dos modelos tridimensionais

As imagens coletadas de cada um dos trinta (30) indivíduos foram

processadas e testadas em softwares de fotogrametria digital (Autodesk 123D, Agisoft PhotoScan e 3DScann) para criação da nuvem de pontos tridimensionais ou também conhecidas como Point Cloud Data (PCD). O processamento das fotos seguiu o padrão dos softwares de fotogrametria digital:

- a) Identificação de pixels ou pontos de referência para o alinhamento e posicionamento das fotos e dos pixels;
- b) Construção da nuvem densa de pontos;
- c) Construção da superfície poligonal por triangulação dos pontos;
- d) Texturização da superfície poligonal.
- e) Construção do sólido tridimensional;
- f) Seccionamento do sólido segundo o traçamento das toras em campo.

Cada um dos objetos tridimensionais criados será processado em software com interface tridimensional para manipulação e ajuste em escala real do objeto tridimensional, usando como referência a demarcação fotográfica nas alturas de 0,1 e 1,3 metros do fuste.

2.2.7 Cálculos volumétricos

O volume dos objetos tridimensionais eram calculados diretamente pelo software de manipulação de objetos 3D.

O volume da cubagem foi calculado conforme fórmula de Smalian:

$$V = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} * L \right) \quad (1)$$

Onde: V= Volume da tora (m³); n: número de seções; g_i= área transversal da secção inferior (m²); g_{i+1}=área da secção transversal superior (m²); L=comprimento da secção (m).

O volume real do xilômetro foi calculado pela seguinte fórmula:

$$V = \Delta L * g_{xil} \quad (2)$$

Onde: ΔL = variação do nível de água após a submersão completa da tora (m); g_{xil} = área transversal da coluna d'água contida no xilômetro (m²).

2.2.8 Gráficos e Testes estatísticos

Para comparação da distribuição diamétrica das árvores e para comparação dos volumes das árvores foram empregados alguns gráficos e testes estatísticos que serão descritos abaixo:

Para comparação das frequências de árvores nas distribuições diamétricas do inventário com as árvores selecionadas para modelagem foi empregado o Teste de X^2 , seguindo as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H0: p = p_0 \\ H1: p \neq p_0 \end{cases}$$

H0: As frequências observadas não são diferentes das frequências esperadas. Não existe diferença entre as frequências (contagens) dos grupos.

H1: As frequências observadas são diferentes das frequências esperadas, portanto existe diferença entre as frequências.

Foram empregados o gráfico dos “volumes reais” (xilômetro) (Y_i) contra os volumes calculados (\hat{Y}_i). Também foi utilizado o gráfico dos volumes das toras contra o erro calculado:

$$Erro(\%) = \frac{V_{real} - V_{calculado}}{V_{real}} * 100 \quad (3)$$

Para averiguação estatística da diferença entre os volumes, foi empregado o teste de t pareado para testar as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H0: \mu_d = \mu_0 \\ H1: \mu_d \neq \mu_0 \end{cases}$$

H0: $\mu_d = \mu_0$ A média das diferenças dos volumes (μ_d) é igual à média hipotética das diferenças (μ_0), ou seja, não existe diferença entre os volumes.

H1: $\mu_d > \mu_0$ A média das diferenças dos volumes (μ_d) não é igual à média hipotética das diferenças (μ_0), ou seja, existe diferença entre os volumes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Inventário Florestal

Aos seis anos de idade o povoamento clonal de *Tectona grandis* L.f. apresentou uma maior frequência de indivíduos (32,9%) na classe de 20 a 21,5 cm de diâmetro à altura do peito (DAP) com amplitude total de 16,5 centímetros (11 a 27,5 cm).

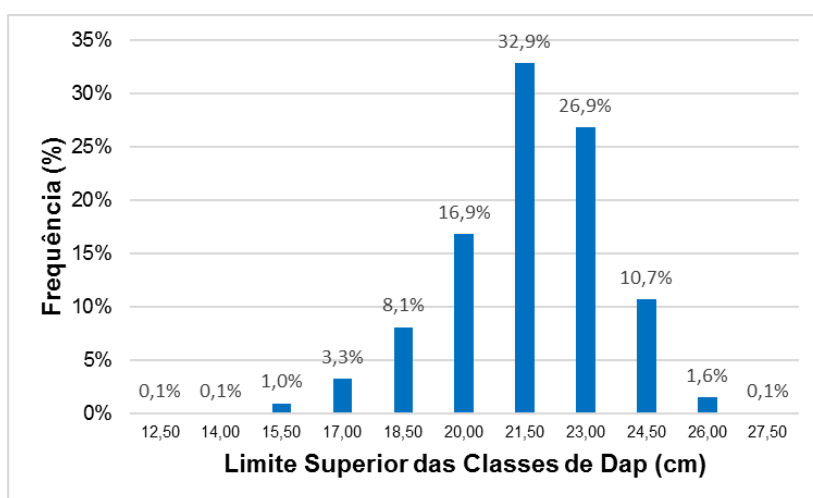


Figura 4: Histograma da distribuição diamétrica dos povoamentos clonais.

Foram mensuradas 10% das alturas totais e comerciais das parcelas com uso de um clinômetro eletrônico Haglof. As árvores apresentaram uma altura total média de aproximadamente 16 metros e altura comercial média de aproximadamente 8 metros de altura (Tabela 1).

Tabela 1: Estatística descritiva das alturas mensuradas nas parcelas amostradas.

	Altura Total	Altura Comercial
Média	15,95	8,39
Desvio padrão	0,78	0,66
Mínimo	14,10	7,27
Máximo	17,00	9,40
Nº de Parcelas	18	18

3.2 Descrição das Árvores Amostradas

Seguindo a proporção da distribuição diamétrica levantada no inventário florestal foi prevista a seleção para a amostragem de trinta árvores para a cubagem pelos diferentes métodos deste trabalho (Figura 5).

O teste de χ^2 indicou não haver diferença entre a distribuição diamétrica prevista para amostragem com a distribuição efetivamente amostrada das trinta árvores: ($H_0: f_o = f_e$) com 95% de confiança, pois $\chi^2_{\text{calculado}}$ (6,20) foi menor que o χ^2_{tabelado} (11,07).

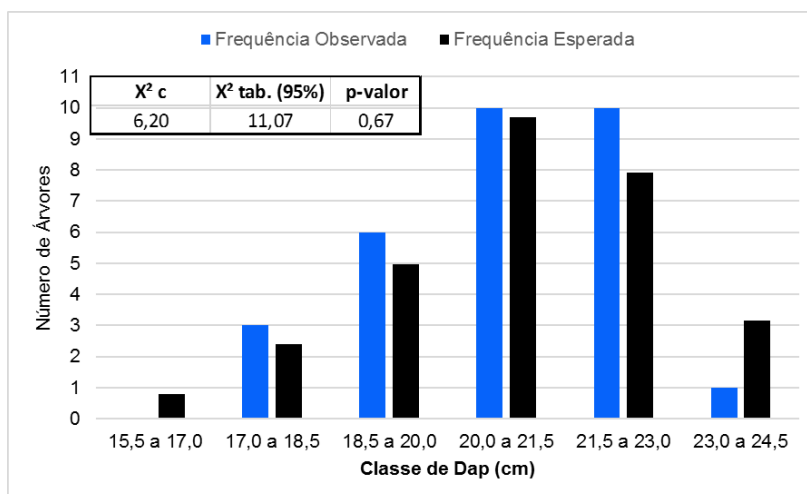


Figura 5: Distribuição diamétrica exigida pelo inventário e das árvores amostradas.

As árvores amostras tiveram um DAP médio de 20,2 centímetros, uma altura total de 15,8 metros, uma altura comercial média de 8,9 metros; além de uma altura de corte do toco média de 10 centímetros (Tabela 2)

Tabela 2: Análise descritiva das árvores amostradas.

	DAP (cm)	Altura do Toco (m)	Altura Comercial (m)	Altura Total (m)
Média	20,16	0,10	8,95	15,77
Desvio Padrão	1,82	0,04	1,40	0,93
Mínimo	16,50	0,03	6,31	13,98
Máximo	23,95	0,20	11,90	17,30
Contagem (N)	30	30	30	30

3.3 Escaneamento e modelagem tridimensional para cubagem 3D

As trinta árvores amostradas tiveram seus fustes comerciais escaneados em média com 40 fotos tiradas ao redor (360°) da mesma, sendo que a menor quantidade de fotos foi 32 fotos e a máxima de 50 fotos. O fotógrafo acompanhava a declividade natural do terreno e as fotos eram retiradas sempre na mesma altura. O fotógrafo possui uma altura de aproximadamente 1,90 metros; e a posição da foto era sempre levemente acima dos olhos (Figura 6)

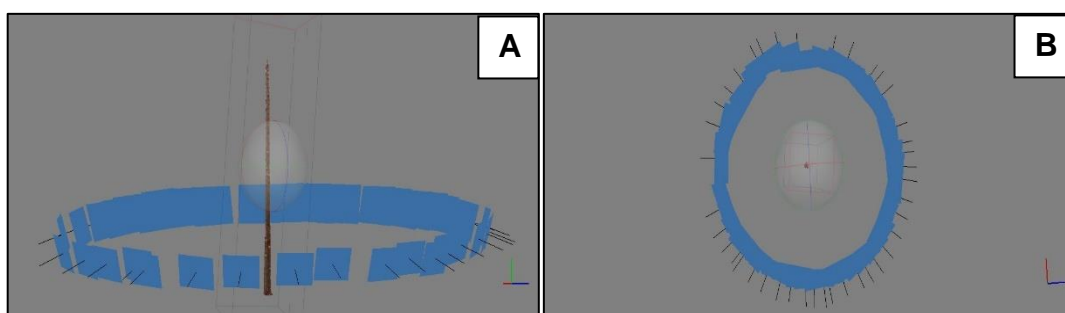


Figura 6: Vista frontal (A) e vista superior (B) das fotos alinhadas para modelagem tridimensional dos fustes de *Tectona grandis* L.f.

O fuste das árvores não pôde ser modelado para todas as árvores nas maiores alturas por causa da qualidade da nuvem de pontos de dados. Assim, a altura média passível de modelagem foi de 6,54 metros de altura, sendo a máxima altura de 9,39 metros e a menor de 3,22 metros de altura. A maior parte dos indivíduos (70%) pôde ser modelado acima de seis metros de altura (Figura 7).

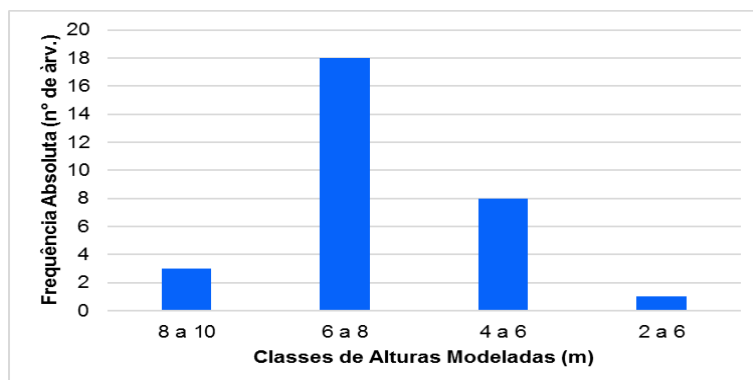


Figura 7: Classes de altura máxima passíveis de modelagem.

A impossibilidade de modelagem do fuste para as maiores alturas pode ser explicada por dois fatores: presença de galhos no fuste e luminosidade irregular por incidência contrária a câmera fotográfica ou por causa do horário da fotografia. Os dois fatores impediram ou atrapalharam a modelagem dos fustes (Figura 8)

Buck et al. (2012) e Buck (2016) também relataram que a presença de galhos resultou numa diminuição da densidade de pontos, principalmente nas partes superiores das árvores, prejudicando a modelagem tridimensional.



Figura 8: A presença de luminosidade irregular e de galhos nas fotografias atrapalha a modelagem dos fustes.

Foi necessário realizar uma “poda virtual” como também descrito por KLEMMT (2010) para limpeza da nuvem de pontos antes da construção do modelo tridimensional.

Considerando que as toras eram traçadas a cada 2,35 metros a partir da altura do toco (aproximadamente 10 centímetros), 87 % dos indivíduos puderam ter pelo menos as duas primeiras toras comerciais modeladas (A e B) e 37% puderam ter três toras comerciais modeladas (A, B e C) (Figura 9).

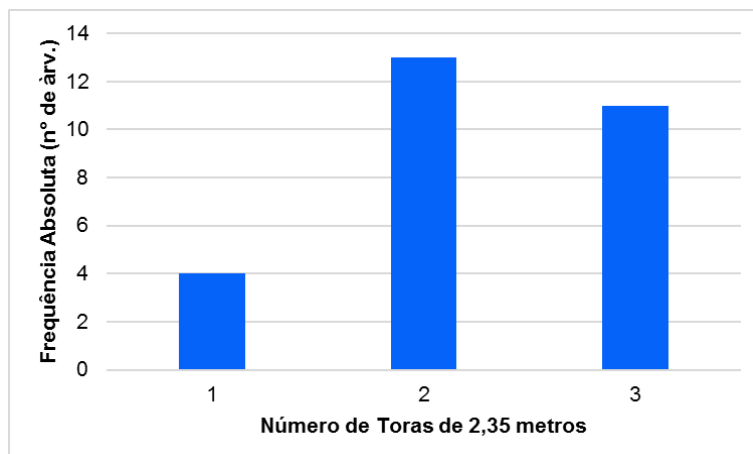


Figura 9: Frequência do número de toras passíveis de serem modeladas por árvore com a técnica de fotogrametria digital.

3.4 Cubagem real pelo método do Xilômetro

As trinta árvores renderam ao todo 121 toras que tiveram seus volumes aferidos com o uso do xilômetro (Tabela 3).

Tabela 3: Estatística descritiva dos volumes das árvores e das toras aferidas.

	Volume Tora A (m³)	Volume Tora B (m³)	Volume Tora C (m³)	Volume Tora D (m³)	Volume Tora E (m³)	Volume Total (m³)
Média	0,0777	0,0523	0,0405	0,0261	0,0114	0,1937
Desvio padrão	0,0114	0,0078	0,0074	0,0055	0,0049	0,0346
Mínimo	0,0558	0,0337	0,0236	0,0161	0,0065	0,1146
Máximo	0,1025	0,0694	0,0538	0,0367	0,0211	0,2362
Contagem (N)	30	30	30	23	8	30

3.5 Cubagem rigorosa pelo método de Smalian

Todas as 121 toras também puderam ter seu volume calculado com a metodologia de Smalian por interpolação linear entre as secções de 0,10 a 2,45 (Tora A), 2,45 a 4,80 (Tora B) e assim sucessivamente a cada 2,35 metros até a altura comercial (Tabela 4)

Tabela 4: Estatística descritiva dos volumes de todas as árvores e toras por classe de altura.

	Volume Tora A (m³)	Volume Tora B (m³)	Volume Tora C (m³)	Volume Tora D (m³)	Volume Tora E (m³)	Volume Total (m³)
Média	0,0822	0,0514	0,0400	0,0273	0,0122	0,1977
Desvio padrão	0,0139	0,0093	0,0076	0,0061	0,0072	0,0380
Mínimo	0,0536	0,0310	0,0249	0,0160	0,0063	0,1132
Máximo	0,1087	0,0732	0,0540	0,0380	0,0284	0,2533
Contagem (N)	30	30	30	23	8	30

3.6 Construção e medição dos sólidos tridimensionais

Após a construção da superfície poligonal texturizada (.obj) o objeto 3D foi colocado em escala real por meio dos pontos de referência das fitas vermelhas marcadas a 0,10 e 1,30 metros de altura do fuste (Figura 10).



Figura 10: Modelo tridimensional de um fuste na escala real

Depois de colocado em escala, este objeto 3D foi seccionado perpendicularmente ao eixo Y na altura de 0,10 centímetros para então ser preenchido como um sólido tridimensional. Este sólido foi então seccionado a cada 2,35 metros no sentido Longitudinal (Y) e o volume de cada tora era calculado no ambiente tridimensional (Figura 11).



Figura 11: Procedimento de corte e seccionamento do sólido tridimensional em seções de 2,35 metros de comprimento.

Foram modeladas e cubadas por inteiro 71 toras nas classes A (0,10 a 2,45), B (2,45 a 4,80 e C (4,80 a 7,15) (Tabela 5). As toras que não puderam ser modeladas por inteiro (2,35 metros) foram desconsideradas.

Tabela 5: Estatística descritiva dos volumes das toras cubadas pelo sólido tridimensional.

	Volume Tora A (m³)	Volume Tora B (m³)	Volume Tora C (m³)
Média	0,0782	0,0477	0,0353
Desvio padrão	0,0133	0,0099	0,0083
Mínimo	0,0573	0,0313	0,0233
Máximo	0,1100	0,0658	0,0524
Contagem (N)	30	26	15

3.7 Desempenho dos métodos de cubagem

Considerando todo o fuste, a cubagem tradicional de Smalian, com intervalos de seções de um metro, obteve erros normalmente distribuídos entre $\pm 35\%$ (Figura 12). Contudo, o teste de t pareado indicou haver diferença significativa (95 % de Confiança) entre os volumes de Smalian e do Xilômetro

($H1: \mu d \neq \mu 0$), pois t calculado (2,64) > t tabelado (1,98).

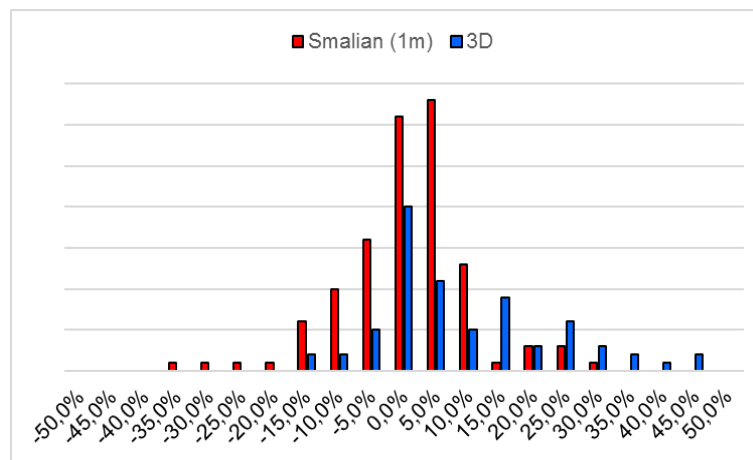


Figura 12: Histograma dos erros de cubagem para os dois métodos de cubagem.

A cubagem pela modelagem tridimensional foi tendenciosa, tendo uma elevada assimetria à direita: os volumes tridimensionais estimados tenderam a subestimar os volumes das toras, principalmente para as toras de menor volume (toras superiores) (Figura 13).

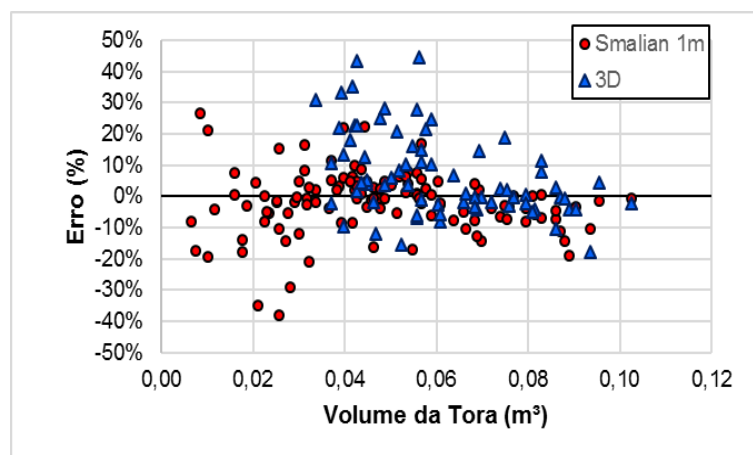


Figura 13: Distribuição gráfica dos resíduos para as estimativas volumétricas das toras comerciais de *Tectona grandis* L.f.

Quando foi analisado o desempenho da cubagem para cada classe de tora (A, B, C, D e E) descobriu-se que a primeira tora comercial (A) teve seu volume estimado com maior acurácia pelo modelo tridimensional que a cubagem tradicional por Smalian (Figura 14). O teste de t pareado indicou não haver diferença

significativa (95 % de Confiança) entre os volumes 3D e os volumes do Xilômetro ($H_0: \mu_d = \mu_0$), pois t calculado (-0,44) < t tabelado (2,05); enquanto que o mesmo teste indicou haver diferença significativa (95 % de Confiança) entre os volumes de Smalian (1 metro) e os volumes do Xilômetro ($H_1: \mu_d \neq \mu_0$), pois t calculado (5,49) > t tabelado (2,05).

No caso da segunda tora (B) a situação se inverteu: a estimativa por Smalian obteve resultados satisfatórios enquanto que o volume 3D teve tendência em subestimar em média 11 % do volume das toras com erro máximo de 44%. (Figura 14).

Buck (2016) observou tendências de subestimativas volumétricas de modelos tridimensionais com erros de até 32 % com dados obtidos com LiDAR terrestre. E Gatziolis et al. (2010) verificaram subestimativas médias dos volumes de 21,29% com desvio padrão de $\pm 10,25$ % quando usou dados de LiDAR terrestre (TLS) para medir diâmetros e estimar volumes através de equações volumétricas.

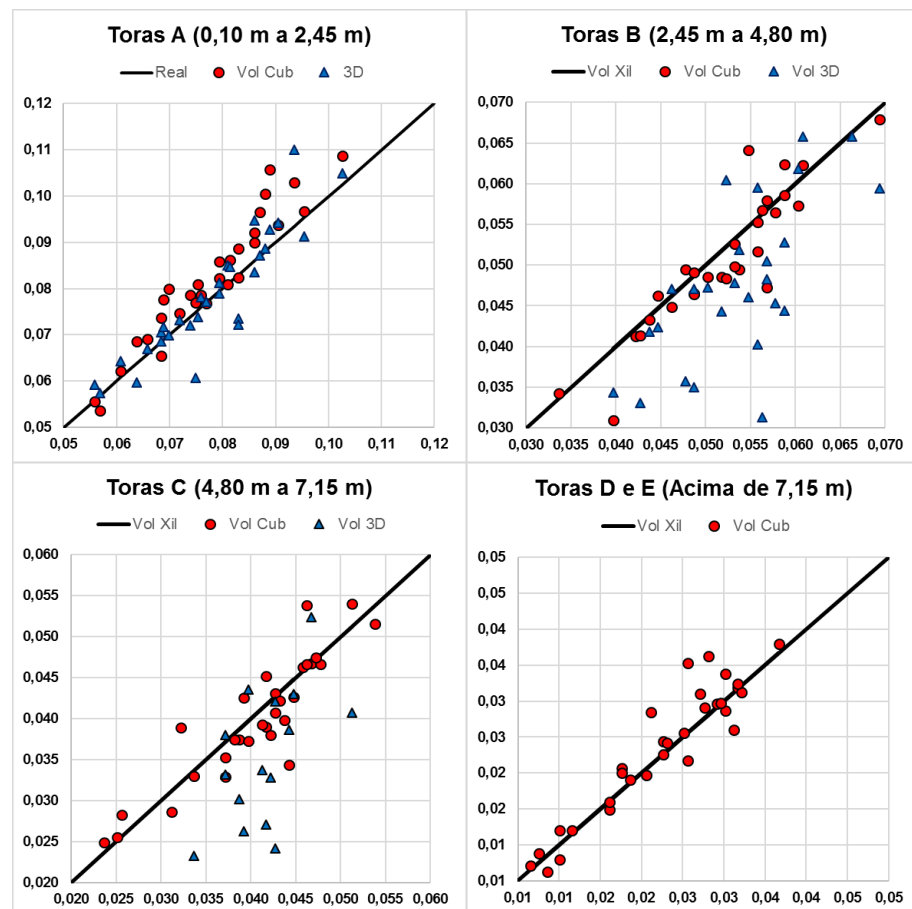


Figura 14: Desempenho dos métodos de cubagem para cada classe de tora.

Para as toras C novamente o método de Smalian foi mais acurado para estimativa dos volumes enquanto que a tendência de subestimar os volumes pelo método 3D aumentou ainda mais. Gatziolis et al. (2010) explicam que a fraca representação na nuvem de pontos das partes superiores do fuste leva a uma subestimação substancial do volume destas secções.

No caso das Toras D e E, o método de Smalian teve boa acurácia enquanto que modelo tridimensional não pôde ser utilizado por causa da impossibilidade de reconstrução da superfície do tronco, causado principalmente pela interferência dos galhos na parte superior da copa ou por causa da luminosidade contrária incidente na fotografia.

Para cada uma das classes de tora foi realizado o teste de t pareado para averiguação da acurácia (Tabela 6).

Tabela 6: Acurácia dos métodos de cubagem para cada classe de tora.

Método	Classe de Tora	t calculado	t crítico bicaudal (95%)	gl	Acurácia
Smalian	A	-5,49	$\pm 2,05$	29	NÃO
Smalian	B	1,37	$\pm 2,05$	29	SIM
Smalian	C	0,84	$\pm 2,05$	29	SIM
Smalian	D,E	-1,88	$\pm 2,04$	30	SIM
3D	A	-0,44	$\pm 2,05$	29	SIM
3D	B	4,11	$\pm 2,06$	25	NÃO
3D	C	3,52	$\pm 2,14$	14	NÃO
3D	D,E	—	—	—	—

Alguns fatores que podem explicar esta falta de acuraciado modelo 3D são: presença de galhos e nós; e a metodologia de coleta fotográfica para a técnica conhecida como Close to Range. A técnica “Close to Range” têm maior sucesso quando são coletadas imagens a diferentes alturas do objeto. Nesta metodologia, o ideal é que o objeto 3D seja imageado sob todos os possíveis ângulos de visada à uma mesma distância do objeto, como que numa “bolha” de raio simétrico (Figura 15).

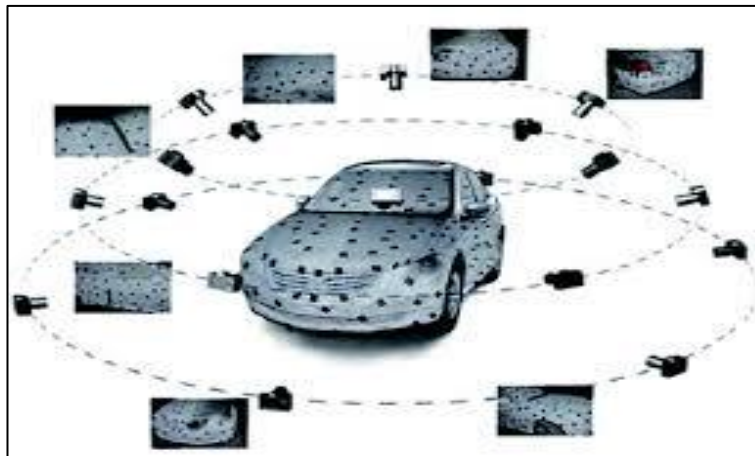


Figura 15: Exemplo da metodologia conhecida como Close to Range.

Fonte: <http://www.3dscan.com.cn/tysw/ueditor/php/upload//20140421/13980707335631.jpg>

A metodologia empregada de escaneamento tridimensional com softwares de fotogrametria digital ainda precisa ser apurada levando em conta fatores como: calibração da câmera fotográfica, disposição e qualidade das imagens retiradas dos fustes, correção de efeitos de distorção das imagens, presença de galhos, luminosidade, softwares e algoritmos empregados para modelagem.

Para a melhoria da metodologia de coleta empregada neste trabalho recomenda-se que em futuros trabalhos:

- a) Fazer a limpeza do fuste com desrama até a altura a ser modelada;
- b) Estabelecer uma distância fixa até a árvore objeto e entre as fotos para controle da paralaxe;
- c) Testar níveis de sobreposição das imagens em sentido horizontal e vertical;
- d) Utilizar uma máquina fotográfica com alta resolução de imagens;
- e) Fazer a calibragem da câmera fotográfica para que não haja distorção das imagens por foco ou luminosidade;
- f) Testar diferentes softwares de fotogrametria digital.

4. CONCLUSÕES

Foi possível modelar tridimensionalmente parte dos fustes e das toras de *Tectona grandis* L.f com a metodologia “Close to Range” através de um software de fotogrametria digital.

Com a metodologia empregada de escaneamento 3D foi possível modelar as toras inferiores (0,10 m a 2,45 m) com maior acurácia do que com o método tradicional de Smalian com secções de um metro.

Com a metodologia empregada de escaneamento 3D as toras acima de 2,45 metros de altura tiveram tendência a subestimar o volume do fuste.

Para as toras superiores acima de 2,45 m o método de Smalian alcançou maior acurácia dos volumes.

O método de Smalian com intervalos entre secções de 1 metro não resultou em acurácia dos volumes para a primeira tora comercial (0,10 m a 2,45 m).

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador por tudo que Ele fez e faz, especialmente pelo dom da vida e do discernimento.

Agradeço a minha família, especialmente a minha esposa Fernanda Miguel Franco por completar a minha existência.

Agradeço aos professores do MBA – Manejo Florestal de Precisão, especialmente ao meu orientador Carlos Roberto Sanquetta que mesmo à distância esteve sempre presente.

Agradeço aos meus amigos, colegas e alunos de engenharia florestal do Instituto Federal d Mato Grosso: Everton, Luiz Orlando, Aldebaran, Breno, Iuri, Divino, Vitor, Klismann, Lucas Duarte, Lucas Salomão, Lucas Antônio e Valteir Siani.

Agradeço ao Sr. Luis e família, pela paciência, auxílio e almoços deliciosos na fazenda Mineira.

Agradeço à família Gouveia pelas porteiras sempre abertas aos nossos alunos do IFMT.

Agradeço ao Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA) pela oportunidade de me especializar a distância em Manejo Florestal de Precisão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUCK, A. L. B ; SILVA, M. N. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. ; PESCK, V. A. **Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de Pinus elliottii a partir de dados laser terrestre**. *Ambiência*, v. 8, n. 4, p. 549-557, 2012.

BUCK, A. L. B. **Modelagem de dados laser scanner terrestre para estimativa do volume em plantios clonais de Eucalyptus spp.** 2016. 146 p. Tese (Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BROWN, M. **Precision Forestry: a journey not a leap**. Precision Forestry Symposium 2014: The anchor of your value chain Stellenbosch, South Africa March 3 - 5, 2014.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: Perguntas e respostas*. 4 ed. rev. e ampl. Viçosa: Ed. UFV, 2013. 605 p.

GATZIOLISA, D.; POPESCUB, S.; SHERIDANB, R.; KUB, N. W. **Evaluation of terrestrial LiDAR technology for the development of local tree volume equations**. Proceedings Silviler 2010: 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems. Freiburg, Germany, 2010.

JIANDONGA, Z; LIYANA, Z; DU XIAOYUA. **Accurate 3D Target Positioning in Close Range Photogrammetry with Implicit Image Correction**. Chinese Journal of Aeronautics 22(2009) 649-657

KLEMMT, H. J.; SEIFERT, T; SEIFERT, S; KUNNEKE, A; WESSELS, B; PRETZSCH, H. **Assessment of branchiness in a Pinus pinaster plantation by terrestrial laser scanner data as a link between exterior and interior wood properties**. Proceedings Silviler 2010: 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems. Freiburg, Germany, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de dados por Estado**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>> . Acesso em: 30 ago. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php>> . Acesso em: 30 ago. 2016.

JAMES, W.D.; ECKERMANN, J.; BELBLIDIA, F. SIENZ, J. Point cloud data from Photogrammetry techniques to generate 3D Geometry. Proceedings of the **23rd UK Conference of the Association for Computational Mechanics** in Engineering 8 – 10 April 2015

SANQUETTA, WATZLAWICK, DALLA CORTE & FERNANDES. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. Curitiba: Curitiba: Mult-Graf, 2006.